

## ЦВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БЛАЗАРА S5 0716+714 В АСПЕКТЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ

М. А. Горбачев<sup>1,2</sup>, М. С. Бутузова<sup>2</sup>, С. В. Назаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет,*

<sup>2</sup>*Крымская астрофизическая обсерватория РАН*

Оптическое излучение блазара S5 0716+714 формируется в его ультрарелятивистском джете в компактной области, расположенной вблизи истинного начала струи. Предполагая, что переменность образуется только за счет изменения коэффициента релятивистского усиления излучения (доплер-фактора) для некоторой части излучающей области и что спектр излучающей области, характеризуемый степенным законом на наблюдаемых частотах, имеет завал на более низких частотах, вызванный синхротронным самопоглощением, мы анализируем архивные данные Крымской астрофизической обсерватории по B-, V-, R-, I-фотометрии блазара S5 0716+714 с 2002 по 2019 г. Получено объяснение наблюдаемому изменению показателя цвета при переменности блазара S5 0716+714 без изменений физических параметров источника.

## COLOR CHARACTERISTICS OF THE BLAZAR S5 0716+714 UNDER GEOMETRICAL ORIGIN OF THE LONG-TERM VARIABILITY

M. A. Gorbachev<sup>1,2</sup>, M. S. Butuzova<sup>2</sup>, S. V. Nazarov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Kazan (Volga Region) Federal University,* <sup>2</sup>*Crimean Astrophysical Observatory of RAS*

The optical radiation of the blazar S5 0716+714 is formed within its ultrarelativistic jet in a compact region located near the true origin of the jet. Assuming that the variability is formed only by changing the relativistic radiation amplification coefficient (Doppler factor) for some part of the emitting region and that the spectrum of the emitting region, characterized by a power law at the observed frequencies, has a turn-over at lower frequencies, caused by synchrotron self-absorption, we analyze the archival data of the Crimean Astrophysical Observatory of B-, V-, R-, I-photometry of the blazar S5 0716+714 from 2002 to 2019. An explanation for the observed change in the color index during the blazar S5 0716+714 variability without changes in the physical parameters of the source was obtained.

## Введение

Блазары — класс активных ядер галактик (АЯГ), релятивистский джет которых направлен под малым углом ( $< 10^\circ$ ) к лучу зрения. Вследствие релятивистских эффектов излучение, образованное в джете, усиливается в системе отсчета наблюдателя и преобладает над излучением других частей АЯГ. Непосредственно джеты на парсековых масштабах наблюдаются методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ). Самый длительный ряд РСДБ-наблюдений нескольких сотен АЯГ реализован на VLBA в рамках программы MOJAVE (<http://www.physics.purdue.edu/astro/MOJAVE/index.html>). На радиокартах проявляются яркая компактная деталь, называемая РСДБ-ядром, и более протяженные и тусклые детали джета. В результате анализа этих данных доказано, что РСДБ-ядро, наблюдаемое на 15 ГГц, это область джета, в которой среда джета становится

оптически прозрачной для излучения данной частоты [1]. Учитывая то, что напряженность магнитного поля и концентрация электронов увеличивается при приближении к истинному началу струи согласно степенным функциям, и то, что в блазарах наблюдается временная задержка между событиями переменности на различных частотах: переменность на большей частоте лидирует и чем больше частотный интервал, тем больше время задержки (см., например, [2]), можно предположить, что излучающая в оптическом диапазоне область расположена ближе к истинному началу струи, чем РСДБ-ядро, и представляет собой часть джета, в которой среда становится оптически прозрачной для оптического излучения.

Обычно полагается, что если переменность возникает за счет геометрических эффектов (т. е. изменения коэффициента релятивистского усиления — доплер-фактора, вызванного изменением угла зрения и/или скорости излучающей области), то показатель цвета не изменяется при изменении яркости объекта. Изменение цвета объекта может быть вызвано только физическими процессами, происходящими в джете. При сделанных предположениях об излучающей в оптическом диапазоне области спектр ее вогнутый и увеличивающийся доплер-фактор некоторой ее части может приводить не только к увеличению общей интенсивности, но и к изменению показателя цвета. Мы анализируем эту возможность, используя данные фотометрических наблюдений блазара S5 0716+714 в полосах В, V, R, I системы Джонсона, выполненных на 70-см телескопе АЗТ-8 Крымской астрофизической обсерватории с 02.2002 по 06.2019.

## Анализ данных

Так как при анализе мы используем формулы синхротронного излучения, то оперировать спектральной плотностью потока ( $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$ , где  $\alpha$  — спектральный индекс) в этом случае удобнее, чем звездными величинами. Мы построили зависимости потоков в фильтрах В, V, R от потока в фильтре I (рис. 1). Наблюдаемые точки хорошо аппроксимируются прямыми, что может свидетельствовать о неизменном  $\alpha$  переменного компонента, если поток постоянного компонента ( $F^c$ ) находится на продолжении этих экспериментальных прямых (см., например, [3]). В нашем случае спектр взятого таким образом постоянного компонента не соответствует излучению никакой части АЯГ. Анализ спектра наблюдаемого излучения показал, что поток ниже 10 мЯн (в фильтре I) скорее всего производится только постоянным компонентом, находящимся в тусклом состоянии со спектральным индексом 2—2.5. Мы предполагаем, что точка, соответствующая постоянному компоненту, находится ниже прямых на рис. 1. Так как рассматриваемая нами область — часть джета, то при движении по изогнутой траектории изменяется ее доплер-фактор, что приводит к изменению  $F^c$ , только на более длительной временной шкале, чем изменения потока переменного компонента ( $F^{\text{var}}$ ). Мы выбрали  $F^c = 10, 30$  и  $50$  мЯн и  $\alpha^c = 1.5$ . Результаты для рассматриваемых в работе  $F^c$  подобны. Поэтому мы иллюстрируем только один случай:  $F^c = 30$  мЯн. Полагая, что наблюдаемый поток — это сумма потоков переменного и постоянного компонентов и что спектральный индекс переменного компонента  $-2.5 \leq \alpha^{\text{var}} \leq 2.5$ , с использованием экспериментальных прямых мы получили наблюдаемый спектр переменного компонента в зависимости от его потока (рис. 2).

На рис. 3 показаны частоты  $\nu'_I$  и  $\nu'_B$  в системе отсчета, сопутствующей релятивистскому джету, которые соответствуют наблюдаемым частотам в фильтрах I и B:  $\nu_{I,B} = \delta_0 \nu'_{I,B} / (1 + z)$ , где  $\delta_0$  — доплер-фактор излучающей в оптическом диапазоне области, рассматриваемой нами как постоянный компонент;  $z$  — красное смещение объекта. В потоке джета возможно развитие (магнито)гидродинамических неустойчивостей и турбулентности, потому в некоторый момент у части излучающей области может увеличиться доплер-фактор из-за уменьшения угла между вектором скорости этой части с лучом зрения. Эту часть излучающей области мы рассматриваем в качестве переменного компонента.

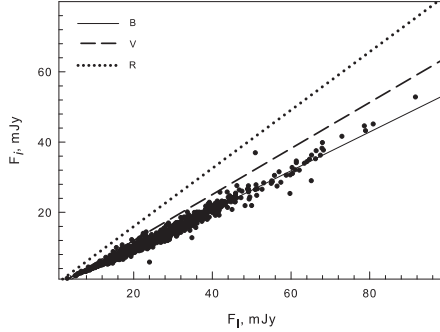


Рис. 1. Линейные аппроксимации наблюдаемого потока в фильтрах B, V, R относительно I по данным наблюдений АЗТ-8. Приведены точки данных для фильтра B, в котором они имеют наибольшие отклонения от линии аппроксимации

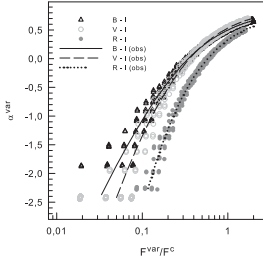


Рис. 2. Экспериментальная зависимость  $\alpha^{\text{var}}(F^{\text{var}})$  и соответствующие ей теоретические точки

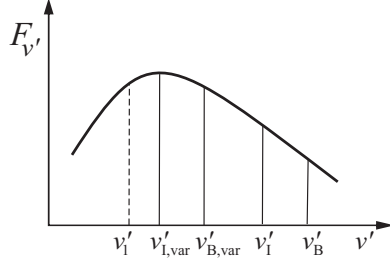


Рис. 3. Спектр излучающей области в системе отсчета, сопутствующей релятивистскому джету

Тогда в поток на наблюдаемых частотах  $\nu_I$  и  $\nu_B$  вносит вклад излучение, образованное на частотах  $\nu'_{I,var}$  и  $\nu'_{B,var}$  в системе отсчета источника. Как видно из рис. 3, спектр между этими частотами становится более плоским, что и приводит к наблюдаемому изменению показателя цвета.

Спектральный поток постоянного и переменного компонента при учете синхротронного самопоглощения выражается как

$$F_i = \delta^{2-5/2} Q' \nu_i^{5/2} (1+z)^{-3+5/2} \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\nu_i (1+z)}{\delta \cdot \nu'_i} \right)^{-\alpha^c - 5/2} \right] \right\} \quad (1)$$

при подстановке соответствующих  $\delta$ ,  $\alpha$  и коэффициентов  $Q'$ . В формуле (1) индекс  $i$  обозначает, что величина относится к соответствующему фильтру из рассматриваемых,  $\nu'_i$  — частота, для которой оптическая толщина среды равна единице. Для каждого фильтра, зная поток постоянного компонента и вводя параметр  $D = Q'_{\text{var}}/Q_c$ , нашли потоки переменного компонента, которые использовали для определения  $\alpha^{\text{var}}$ . При этом  $\delta_{\text{var}}$  изменяли от 10 до 32 с шагом 0.1,  $\nu'_1$  — от  $10^{13}$  до  $9.5 \cdot 10^{13}$  Гц с шагом  $0.5 \cdot 10^{13}$  Гц. Так как мы подразумеваем, что есть одна излучающая область, а переменность образуется за счет увеличения

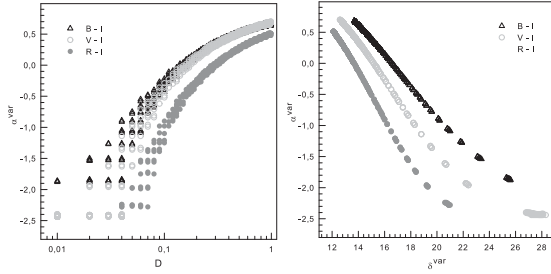


Рис. 4. Зависимость  $\alpha^{\text{var}}$  от  $D$  (слева) и от  $\delta_{\text{var}}$  (справа)

доплер-фактора некоторой части этой области, то магнитное поле и концентрация релятивистских электронов, входящие в  $Q'_c$  и  $Q'_{\text{var}}$ , одинаковые, следовательно,  $D$  определяется только отношением угловых размеров переменного и постоянного компонента. Поэтому  $D$  изменяли от 0.01 до 1 с шагом 0.01. Отбирали теоретические точки, попадающие в интервал  $-\sigma \leq F_{i,j}^{\text{var}} \leq \sigma$ , где  $\sigma = 0.65$  мЯн — стандартное отклонение значений потока переменной компоненты по данным наблюдений (см. рис. 2). Получили, что значения  $\nu'_1$  находятся в интервале  $2 \cdot 10^{13} - 7 \cdot 10^{13}$  Гц, максимальное количество точек приходится на  $\nu'_1 = 3.5 \cdot 10^{13}$  Гц, которую взяли для построения зависимостей  $\alpha^{\text{var}}$  от  $D$  и от  $\delta_{\text{var}}$  (рис. 4).

## Выводы

Мы предположили, что оптическое излучение блазара S5 0716+714 приходит из области джета, в которой среда джета становится прозрачной для излучения данной частоты. При этом переменность потока излучения может возникать вследствие увеличения доплер-фактора некоторой части излучающей области. При вогнутом спектре излучающей области это приводит к изменению показателя цвета объекта при росте потока. На основе многолетних данных фотометрических наблюдений мы показали, что данная интерпретация объясняет наблюдаемые долговременные свойства переменности S5 0716+714. При этом чем меньше размер части области, ответственной за переменность, тем больший доплер-фактор ей присущ.

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ (грант 19-72-00105).

## Библиографические ссылки

- [1] *Pushkarev A. B., Hovatta T., Kovalev Y. Y. et al.* MOJAVE: Monitoring of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments. IX. Nuclear opacity // *Astron. Astrophys.* — 2012. — Vol. 545. — P. A113. 1207.5457.
- [2] *Raiteri C. M., Villata M., Tosti G. et al.* Optical and radio behaviour of the BL Lacertae object 0716+714 // *Astron. Astrophys.* — 2003. — Vol. 402. — P. 151–169. [astro-ph/0302518](#).
- [3] *Hagen-Torn V. A.* On the separation of components of radiation of variable extragalactic sources // *Astrofizika.* — 1985. — Vol. 22. — P. 449–460.